

Das Internet der Dinge im städtischen Abwassersystem – Potenziale der LoRa-Technologie für reichweitenkritische Anwendungen im Untergrund

Frank Blumensaat^{1,3*}, Fabian Schaltegger², Christian Ebi³, Andreas Rüst²

¹⁾ Institut für Umweltingenieurwissenschaften, Professuren für Siedlungswasserwirtschaft, ETH Zürich, Schweiz

²⁾ Institute of Embedded Systems, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, Winterthur, Schweiz

³⁾ Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (Eawag), Dübendorf, Schweiz

* E-Mail: frank.blumensaat@eawag.ch

Schlagworte: IoT, LoRaWAN, Raum-Zeit-Dynamik, Internet der Dinge, Infrastrukturüberwachung, Quality of Service, Telemetrieperformanz

Zusammenfassung

Hat Niedrigenergiefunk (LPWAN) das Potenzial die Prozessüberwachung in Infrastrukturen im Untergrund zu revolutionieren? Inwieweit eignen sich LPWANs, als neuartige Drahtlos-übertragung des Internet-der-Dinge bekannte Technologie, für eine räumlich differenzierte und effiziente Langzeitüberwachung? Kann der etablierte LoRaWAN-Standard für reichweitenkritische Anwendungen angepasst werden?

Grundlage für die Erörterung dieser Fragen sind einerseits unsere Erfahrungen seit Mai 2016 beim Aufbau und dem Betrieb eines Drahtlossensornetzwerks mit im Untergrund installierten Sensoren in einer mittelgrossen Schweizer Gemeinde, und andererseits die daraus entstandene Neuentwicklung eines vermaschten LPWANs basierend auf der LoRa-Technologie [1]. Im Einzelnen beleuchten wir i) die technischen Anforderungen an Sensorik und der Datenübertragungstechnologie für Anwendungen im Untergrund, ii) die Anwendungserfahrungen bezüglich Funkreichweite, Skalierbarkeit und Übertragungszuverlässigkeit, und iii) eine technologische Weiterentwicklung, welche die Reichweitenlimitierung entschärft und so eine effiziente Übertragung aus dem Untergrund ermöglicht.

Unsere Untersuchungen unterstreichen die grundsätzliche Eignung des LoRaWAN - Standards für eine Echtzeit-Überwachung von Prozessabläufen im Untergrund. Technologiespezifische Grenzen (Reichweite, Quality of Service) werden durch unsere Langzeitexperimente quantitativ aufgezeigt. Die Neuentwicklung eines vermaschten, LoRa-basierten Funks verbessert die Zuverlässigkeit der Übertragung erheblich. Sinnvoll eingesetzt kann diese Neuerung einen wesentlichen Beitrag zur stabilen Prozessüberwachung von Infrastruktur im Untergrund leisten.

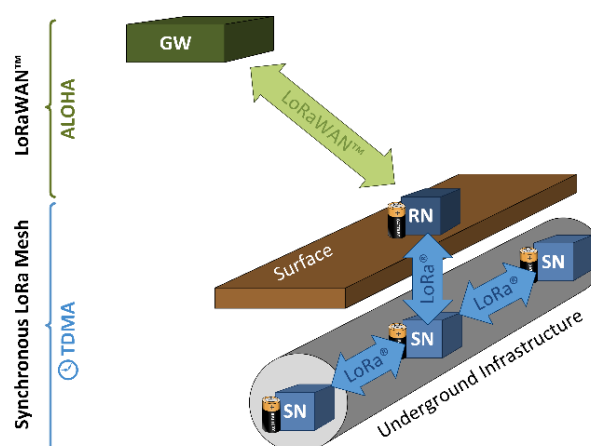


Abbildung 1: schematische Darstellung des neuentwickelten vermaschten Funkstandards

1. Einleitung

Die Raum-Zeit-differenzierte Überwachung von Abflussprozessen in Entwässerungssystemen stellt naturgemäss hohe Anforderungen an Sensorik und Datenübertragung. Der Netzwerkcharakter, der eingeschränkte Zugang zu unterirdischer Infrastruktur, die unwirtlichen, teils gesundheitsgefährdenden Milieubedingungen, sowie die schnell und zufällig wechselnde Belastungssituation (Regen-/Trockenwetter) stellen wesentliche Herausforderungen beim Erfassen von Volumen- und Stoffströmen dar. Die bis dato begrenzte Verfügbarkeit von kontinuierlichen, ortsdifferenzierten Informationen verhindert oft eine effiziente Bewirtschaftung; Frühwarnungen im Falle von Havariesituationen oder Kapazitätsüberschreitungen (urbane Sturzfluten) sind in aller Regel nicht möglich.

Aktuelle Entwicklungen im Zusammenhang mit dem digitalen Wandel (Digitalisierung, IoT, Vernetztes Rechnen, Maschinelles Lernen, Künstliche Intelligenz) suggerieren ein enormes Potenzial hinsichtlich der Erfassung und Auswertung von Informationen zu Stoff- und Produktionsströmen, auch in der Siedlungsentwässerung. Dabei können die Leistungen der digitalen Transformation in zwei Bereiche unterteilt werden: 1. Immer mehr Daten können mittels Sensoren erfasst und übertragen werden. 2. Diese Daten werden kohärent verarbeitet, mit dem Ziel das Systemverständnis zu verbessern und um Prozessabläufe effizienter steuern zu können.

Niedrigenergiefunknetze (LPWANs) versprechen Daten von bis zu mehreren hundert Sensoren drahtlos über eine einzelne Gateways in das Internet zu übertragen. Während erste Versuche, vor allem in den USA mit speziell entwickelten Kommunikationssystemen bereits in den frühen 2000er Jahren getestet wurden [2-4], ist derzeit noch unklar, welche der mittlerweile standardisierten Technologien die rasante Entwicklung in diesem Bereich überlebt. Neben zahlreichen Simulationsstudien [5, 6] und theoretischen Betrachtungen [7] fehlen jedoch solide Erfahrungen von realen Anwendungen im Vollmassstab, vor allem Langzeitbetrachtungen. Technische Aspekte wie Übertragungszuverlässigkeit, Funkreichweite, Durchsatzbeschränkungen, gerichtete Kommunikation, Signalarouting, Zeitsynchronisation, Energieverbrauch und Informationssicherheit müssen den speziellen Anforderungen einer Anwendung gerecht werden und dementsprechend systematisch evaluiert werden.

Ziel des vorliegenden Beitrags ist es,

- i) die erfolgreiche Etablierung eines autarken Drahtlossensornetzwerks in einem städtischen Entwässerungssystem im Vollmassstab zu veranschaulichen, und gleichzeitig auf die Herausforderungen im Zusammenhang mit einer solch umfassenden Implementierung einzugehen,
- ii) die Potenziale und Grenzen der LoRaWAN-Technologie für die Bewirtschaftung unterirdischer Infrastrukturen einzuschätzen,
- iii) eine Lösung für anwendungsspezifische Limitierungen zu präsentieren, die eine zuverlässige Funkübertragung aus dem Untergrund ermöglicht.

2. Besondere Anforderungen an die Datenübertragung aus dem Untergrund

Die Möglichkeiten der Übertragung von Informationen zu System- und Prozesszuständen in Entwässerungsnetzen sind vielfältig: drahtgebunden, z.B. über Kupfer-, Glasfaserkabel, drahtlos via Mobilfunknetz, offline über Datenlogger. Massgebend für die Wahl eines Übertragungskonzeptes sind im Wesentlichen: die Menge an zu übertragenden Informationen (Videostreams vs. Binärsignale), die Art der Nutzung dieser Information (Echtzeitsteuerung

eines Netzes vs. temporäre Einzelmessung) und der Energieverbrauch für Messung und Datenübertragung.

Während drahtgebundene Lösungen zuverlässig sind, die Realisierung aber oft mit einem erheblichen Installationsaufwand verbunden ist, versprechen drahtlose Übertragungsmethoden ein hohes Mass an Flexibilität bei vergleichsweise geringen Investitionskosten. Diesen Vorteil bezahlt man mit erhöhten Wartungsintervallen und eingeschränkter Übertragungszuverlässigkeit. Offline-Applikationen entziehen sich durch fehlenden Fernzugriff einer *ad hoc* – Funktionskontrolle, sodass nicht selten ein vermeidbarer Datenverlust eintritt (Batteriespannungsabfall, Ringspeicherüberschreibung), der vor allem bei umfangreicheren, integralen Messvorhaben eine unwiederbringliche Informationslücke hinterlässt.

Allen Anwendungen gemein ist: i) ein mitunter erheblicher Aufwand bei Installation in schwer zugänglichen und explosionsgefährdeten Räumen im Untergrund, der sich wartungsintervallabhängig erhöht und ii) eine eingeschränkte Skalierbarkeit bzw. Flexibilität bei der Implementierung (Ausbringung, Installation). Daraus lassen sich folgende Bedarfe ableiten:

- eine zuverlässige Datenübertragung für eine möglichst lückenlose Messwertzeitreihe,
- eine hinreichend grosse Übertragungsreichweite im bebauten Gebiet und aus dem Untergrund,
- eine solide Energieversorgung von Sensorik und Übertragungstechnologie mit Batteriestandzeiten von mindestens einem Jahr,
- eine einfache, schnelle Installation ohne bauliche Veränderungen, wie z. B. die Herausführung von Antennenleitungen oder der Einbau von speziellen funkfähigen Schachtabdeckungen,
- ein Funkstandard ohne Herstellerbindung für Peripheriegeräte, möglichst nicht-proprietär und ohne Lizenzgebühr,
- ein solider Standard bezüglich Informationssicherheit,
- Hardware und Technologie, die aufgrund ihrer Eigenschaften für den Einsatz in explosionsgeschützter Umgebung geeignet ist.

3. Motivation: ein Sensornetz im Digitalen Feldlabor UWO¹

Hauptantrieb für die Entwicklung einer effizienten LPWAN-Lösung ist die Etablierung eines großmaßstäblichen Sensornetzes im Untergrund im Rahmen der im November 2015 gestarteten Forschungsinitiative „Das Urbanhydrologische Feldlabor“ (The Urban Water Observatory – UWO¹). Mit diesem Langzeitvorhaben wollen wir die Dynamik des urbanen Wasserhaushalts einer mittelgrossen Schweizer Gemeinde messtechnisch erfassen und somit die Basis für datengetriebene Wasserforschung schaffen. Neben den Untersuchungen zum Wasserhaushalt bietet dieses Feldlabor ebenso die Möglichkeit, neuartige Technologien in Bezug auf Praxistauglichkeit für die Siedlungsentwässerung unter Realbedingungen zu testen und zu optimieren. Der folgenden Abschnitt beschreibt Untersuchungsgebiet, Funknetz, Sensorik und Netzwerkmanagement.

Das Untersuchungsgebiet befindet sich 20 km nordöstlich der Stadt Zürich in der Gemeinde Fehraltorf. Das Entwässerungsnetz schließt 13 km Mischwassersammler, 4.6 km Schmutzwasserkanäle, und 10.9 km Regenwasserkanäle ein. Das gesamte Siedlungsgebiet umfasst 152 ha und hat eine räumliche Ausdehnung von etwa 3 km x 3 km (siehe Abbildung 2). Die

¹ Details sind unter www.eawag.ch/uwo abrufbar (letzter Aufruf am 07.10.2020).

Sensoren sind entsprechend der Zielstellung des Monitorings im zentralen Teil des Entwässerungsnetzes installiert, vorwiegend entlang der Hauptsammler. Neben den über das LPWAN vernetzten Sensoren wird zu Referenzzwecken zusätzlich ein Monitoring-Backbone, bestehend aus derzeit fünf konventionellen Abflussmessungen und vier Regenmessern mit Mobilfunk-Datenübertragung betrieben (siehe Abbildung 2).

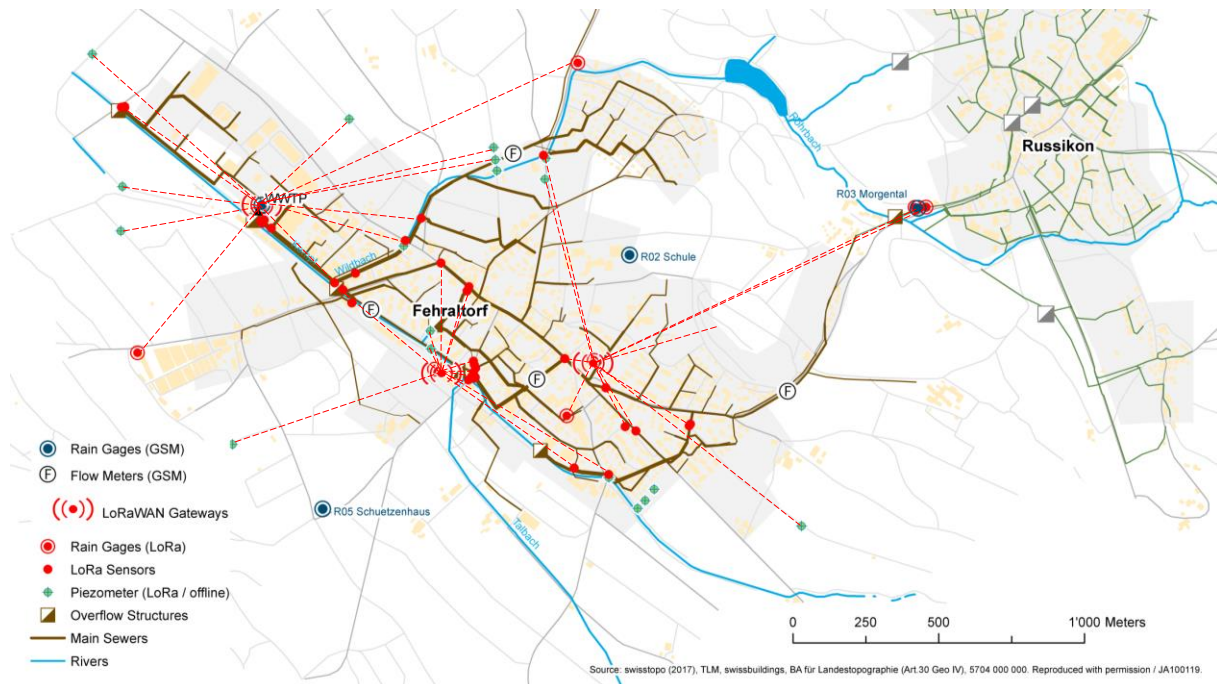


Abbildung 2: Sensorik und Funkinfrastruktur im Einzugsgebiet der Gemeinde Fehraltorf (Stand: November 2018). Unterbrochene Linien zeigen die präferierten Funkverbindungen zwischen LoRaWAN – Gateways und Sensorknoten.

Funksystem: Die Datenfernübertragung zwischen lokalen Sensorknoten und Gateways erfolgt grundsätzlich im Sub-Gigahertz-Bereich nach dem LoRaWAN - Standard [8]. Diese Methode ermöglicht eine *per se* bidirektionale Funkverbindung zwischen autarken Sensorknoten und Gateways über eine mittlere Reichweite von bis zu 20 km (oberirdisch, abhängig von Sichtverbindung und Wetterbedingungen). Unsere Entscheidung den Datentransfer mittels LoRaWAN zu realisieren, ist im Wesentlichen durch drei Aspekte begründet: i) Datenübertragung im Niedrigenergiebereich auf einem lizenzfreien Frequenzband, ii) ein Standard mit Open-Source-Charakter, der zunehmend das Interesse einer breiten Community von Entwicklern und Anwendern weckt und iii) die Verfügbarkeit des LoRaWAN – Standards zu Projektbeginn Ende 2015.

Die LoRaWAN-Netzwerkarchitektur ist standardmässig als sternförmige Topologie aufgebaut, d.h. Sensor-Knoten kommunizieren mit dem am besten verfügbaren Gateway. Gegenwärtig betreiben wir drei Gateways (Kerlink Wirnet Station 868), eine autark mit Solarenergie betrieben und zwei mit Netzstrom. Diese empfangen Signale der Sensorknoten und übermitteln die Daten über eine Mobilfunkverbindung an einen Netzwerkservers.

Sensorik und Funkknoten: Im Untersuchungsgebiet sind derzeit insgesamt 111 LoRaWAN-Sensorknoten implementiert (siehe Abbildung 2), die mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten Systemzustände messen und übertragen. Darunter sind Sensoren zur Erfassung von Pegelständen, Kapazitäten in Abwasserbauwerken, Wasser-, Luft- und Bodentemperatur,

Drucksonden, Multiparameter-Sonden zur Überwachung von Grundwasserstand und –qualität, und Regenmesser. Die Verwendung einer Betriebsspannung niedriger als 5 V sowie einer Stromaufnahme von einigen Milliampere für Sensoren und Funkmodule vereinfacht die Realisierung von eigensicheren Geräten als Zündschutz in explosionsgefährdeten Umgebungen.

Die Funkknoten sind teilweise hauseigene Prototypen (siehe Abbildung 3), teilweise als Serienprodukte über regionale Hersteller bezogen (siehe Abbildung 4). Die Prototypen werden mit Lithium Polymerbatterien (3.7V, 6700 mAh), die fremdproduzierten Knoten mit zwei handelsüblichen LR14, resp. LR20 Alkali-Mangan Baby/Monozellen oder ebenfalls eingebauten Lithium Polymerbatterien betrieben. Für Knotentypen mit einem Messintervall von fünf Minuten ergibt sich eine Standzeit von etwa zwei Jahren, bei Piezometermessstellen mit stündlichem Mess- und Sendeintervall noch länger. Sensor und Funkknoten sind überwiegend durch ein Sensorkabel verbunden, sodass beide Komponenten optimal positioniert werden können.



Abbildung 3: Sensorknoten, Prototyp. Sichtbar sind: Antenne, Kabelanschluss, Board mit Microcontroller und Funkmodul.



Abbildung 4: Piezometermessstelle, CTD-Sonde mit LoRaWAN-Funkmodul (Fremdproduktion).

Netzwerkmanagement: Für die Steuerung von Funkkanälen und Datenraten der Sensorknoten und die Weiterleitung der Datenpakete setzen wir Software und Infrastruktur der Firma *Lo-riot.io* (Thalwil, Schweiz) ein. Auf dem hauseigenen Server werden die Daten automatisiert in einer eigens entwickelten Datenbanklösung² abgelegt und stehen für verschiedene Anwendungen, z. B. Visualisierung über eine öffentlich zugängliche Webseite³ oder wissenschaftliche Auswertungen sowie Modellierung zur Verfügung.

4. Beschränkte Übertragungszuverlässigkeit des LoRaWAN

Die Evaluierung der Leistungsfähigkeit des Funknetzwerks basiert zum einen auf Erfahrungen aus dem etwa vierjährigen Netzbetrieb (seit Mai 2016) von gegenwärtig 111 installierten Sensorknoten, und zum anderen auf der systematischen Auswertung der Betriebsparameter in einer frühen Phase des Vorhabens, im Zeitraum Januar 2017 bis Mai 2017.

Funkreichweite, Übertragungszuverlässigkeit, Netzabdeckung: Vor der Implementierung der Sensorknoten wurden standortspezifische Reichweitentests durchgeführt, um den Netzempfang oberirdisch und im Kanal zu prüfen. Anfangs waren wir überzeugt, dass mit nur zwei Gateways eine ausreichende Abdeckung des gesamten Stadtgebietes (Ausdehnung ca. 3

² <https://datapool.readthedocs.io/en/latest/>

³ www.uwo-opendata.eawag.ch (letzter Aufruf am 07.10.2020).

km x 3 km) mit LoRaWAN erreicht werden kann. Andererseits war der Empfang an Standorten im Untergrund drastisch reduziert.

Vor diesem Hintergrund beobachteten wir für unterirdisch platzierte Funkknoten eine stark abnehmende Übertragungszuverlässigkeit, d.h. eine stark wachsende Paketverlustrate (PER) mit zunehmender Entfernung vom Gateway. Im schlechtesten Fall sinkt die Zuverlässigkeit mit der ein Datenpaket übertragen wird auf 63 %, d.h. 27 % der Pakete gehen verloren – siehe Abbildung 5. Für überirdisch installierte Funkknoten ist diese distanzabhängige Reduktion erwartungsgemäß ebenso existent, jedoch weit weniger ausgeprägt. Für den Zeitraum Januar bis Mai 2017 insgesamt wurden im Mittel 83 % aller Pakete übertragen, wobei immer etwa 70 % aller implementierten Sensorknoten direkt aus dem Untergrund sendeten.

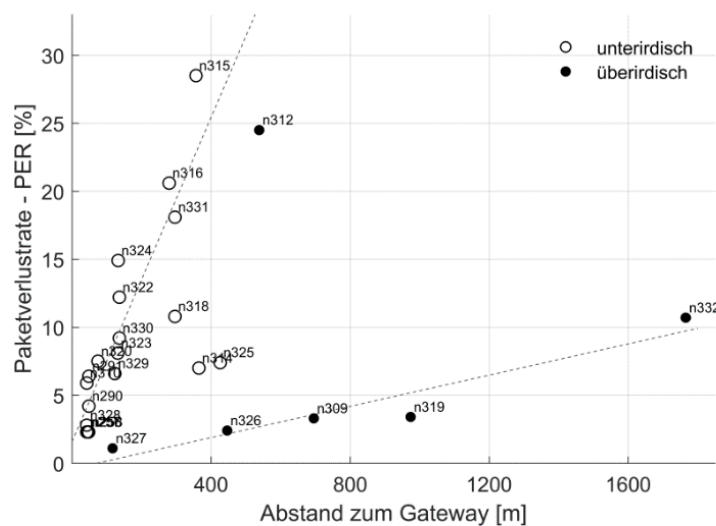


Abbildung 5: Paketverlustrate (PER) in Abhängigkeit von der Distanz zwischen Sensorknoten und Gateway. Grundlage für diese Evaluierung sind Betriebsdaten im Zeitraum Januar - Mai 2017 von insgesamt 25 LoRaWAN-Sensorknoten. Im Untergrund platzierte Sensorknoten sind mit ausgefüllten Punkten dargestellt, die unterbrochenen Linien veranschaulichen den über lineare Regression geschätzten mittleren Zusammenhang. Der Knoten n312 wurde als Ausreißer in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Generell stellen wir fest, dass die Netzabdeckung stark variiert und im Wesentlichen von folgenden Faktoren abhängt: i) geographische Lage (Sichtkontakt) und Entfernung zum Gateway, ii) Bebauungsdichte, d.h. die Ablenkung des Funksignals z. B. durch höhere Gebäude oder besonders dichte Bebauung und iii) Art und Dicke des Schachtdeckels sowie der Installationshöhe der Antenne im Untergrund. Vor diesem Hintergrund sind die hier dokumentierten Erfahrungen, aber auch Angaben von Netzbetreibern zur Reichweite zu interpretieren.

Während Engpässe bei der oberirdischen Netzabdeckung durch eine höhere Gateway-Dichte kompensiert werden können, stellt der begrenzte Empfang im Kanal (d.h. im Untergrund) eine gesonderte Herausforderung dar. Empirisch lässt sich die Abdeckung nur schwierig in Zahlen fassen, da die Übertragungsperformance individuell und unter Berücksichtigung der oben genannten Faktoren für jeden Knoten variieren kann. Unsere Erfahrungen ergaben eine maximale Reichweite von etwa 500 m zwischen Gateway und unterirdischer Sensorknoten (vgl. Abbildung 5). Werden die Anordnung der Funkantenne (oberirdisch) von der unterirdischen Platzierung des Sensors entkoppelt oder leistungsfähigere Antennen verwendet, kann die Übertragungszuverlässigkeit situativ entscheidend optimiert werden. Oberirdisch sind die Übertragungsdistanzen höher und können unter idealen Bedingungen bis in den zweistelligen Kilometerbereich gehen.

Funknetzkapazität: Die regulatorische Beschränkung der Funknetzkapazität (*engl.*: Duty Cycle Restriction) auf 1 % Sendeaktivität bezogen auf die gesamte Standzeit ermöglicht einerseits eine lizenzkostenfreie Übertragung, kann jedoch andererseits die Anwendung schnell limitieren, z. B. wenn eine Vielzahl von Sensorknoten in hoher Frequenz übertragen. So wäre eine Messwertübertragung jede Minute im Regenwetterfall durchaus wünschenswert. Mit der gegenwärtigen Konfiguration des Sensornetzes, d.h. 111 Sensorknoten, drei Gateways, Übertragungsintervall überwiegend fünf Minuten, kleine Datenpakete von wenigen Bytes, erreichen wir die Kapazitätsgrenzen bisher nicht. Ob und inwieweit v. a. eine Erhöhung des Übertragungsintervalls (quasi-Echtzeit) die erlaubte Kapazität ausschöpft, ist von Qualität des Funksignals, der Anzahl der eingesetzten Gateways, sowie der zu übertragenden Datenmenge abhängig und daher im Einzelfall zu prüfen. Intelligente Methoden, wie z. B. Datenkompression auf dem Sensorknoten, adaptive Mess- und Übertragungsintervalle können helfen, die Technologie trotz *per se* Limitierung optimal auszunutzen.

Bidirektionalität: Die bidirektionale Kommunikation unterliegt technologischen sowie den o.g. regulatorischen Kapazitätseinschränkungen. Inwieweit das Aufspielen von Firmware-Updates oder das Senden von Steuersignalen via *downlink* sinnvoll und machbar ist, ist Gegenstand aktueller Untersuchungen. So studieren wir, wie Mess- und Übertragungsraten situativ angepasst, z. B. kürzere Messintervalle während Regenwetterbedingungen durch eine Niederschlagsprognose ausgelöst werden können.

Energieverbrauch: Die Standzeit der batteriebetriebenen Sensorknoten wurde generell mit etwa zwei Jahren abgeschätzt. Diese kann jedoch in Abhängigkeit von Sensortyp, Standort, Mess- und Übertragungsintervall und Übertragungsbedingungen stark variieren. Bei Sensorknoten, die im Mai 2016 installiert wurden und alle fünf Minuten Daten übertragen, mussten die zwei D-Zellen schlussendlich erst nach einem Zeitraum von drei Jahren ausgetauscht werden.

5. Erhöhung der Reichweite durch ein vermaschtes LoRa-Funknetz

Um die zuvor diskutierte Reichweitenlimitierung zu entschärfen, gibt es grundsätzlich die Möglichkeit weitere LoRaWAN-Gateways zu platzieren, sodass eine kritische Entfernung von etwa 500 m zu den Funkknoten im Untergrund nicht überschritten wird. Da diese Option nur im Rahmen von eigenbetriebenen Funknetzwerken umsetzbar sowie mit Standortsuche und Mehrkosten verbunden ist, entwickelten wir eine ebenfalls auf der LoRa-Modulation [9] basierende, alternative Übertragungsmethode [1]. Diese im Arbeitstitel *LoRaMesh* genannte Technologie kann als Erweiterung des existierenden LoRaWAN-Standards verstanden werden. Die phänotypischen Hauptmerkmale sind stromsparende, batteriebetriebene Repeaterknoten (RN), die die Bildung einzelner Subnetzwerke ermöglichen (siehe Abbildung 6).

Grundkonzeption: Dafür verändern wir die ursprünglich sternförmige LoRaWAN-Netzwerktopologie zu einer Baumstruktur, die Datenpakete werden über mehrere Hops (Multi-Hop-Methode) von Knoten zu Knoten übertragen. Dies ermöglicht ein flexibleres Signalarouting, und damit eine resilientere Funknetzarchitektur. Vor allem aber erhöht es die Effizienz der Übertragung und die vormals eingeschränkte Signalreichweite im Untergrund. Innerhalb eines Subnetzes fungieren Repeaterknoten als Wurzel für untergeordnete Knoten (Sensorknoten - SN), die sich außerhalb der LoRaWAN-Abdeckung befinden (*vgl.* Abbildung 6). Die gleiche physikalische Funktechnologie (LoRa [9]) bildet die Grundlage für beide Netzwerkprotokolle, LoRaWAN und *LoRaMesh*. Die für RN und SN eingesetzte Hardware ist identisch.

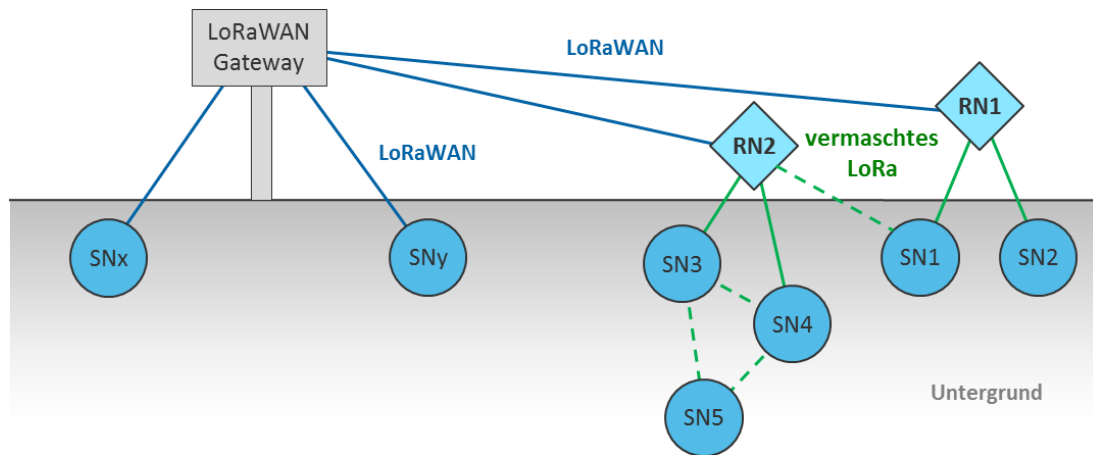
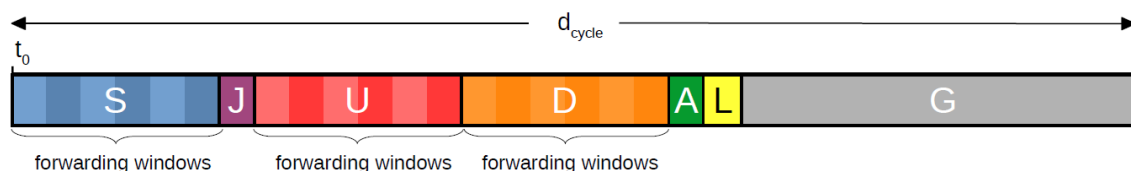


Abbildung 6: Schematische Darstellung des LoRaMesh – Konzeptes (RN: Repeaterknoten; SN: Sensorknoten). Unterbrochene Linien zwischen den LoRaMesh-Sensorknoten illustrieren die vollständige Funktionalität des LoRaMesh-Konzeptes. Dieses steht für ein Netzwerk, in dem jeder Knoten direkt (ohne Relais) mit jedem anderen Knoten kommunizieren kann.

Netzwerkrouting: Die in LoRaMesh verwendeten Baumstrukturen werden dynamisch aufgebaut. Knoten, welche sich neu anmelden, werden an der günstigsten Position in einen bestehenden Baum eingefügt. Die Routingtabellen aller Knoten werden dabei aktualisiert. Knoten, welche nicht mehr erreichbar sind, werden nach einer definierbaren Zeit aus dem Baum entfernt. Zentrales Element von LoRaMesh ist eine bedarfsabhängig nutzbare Zeitschlitzstruktur (Time-Division Multiple Access - TDMA). Dies verhindert Paketkollisionen durch gleichzeitig sendende Knoten. Solche Paketkollisionen führen zum Verlust von Paketen oder machen ein mehrmaliges Senden von Paketen erforderlich. Letzteres erhöht den Energieverbrauch, die Batterielaufzeit würde sich maßgeblich verkürzen.

Übertragungszyklus: Die Zeitschlitzte verteilen sich auf wiederholende Übertragungszyklen. Die Zyklusdauer ist konfigurierbar und liegt typischerweise in der Größenordnung von 5 bis 15 Minuten. Ein Zyklus ist in Phasen mit Zeitschlitzten eingeteilt (siehe Abbildung 7). Ein Zyklus beginnt mit der Synchronisations-Phase (S). Die Zeitschlitzte in dieser Phase dienen dazu, die Referenzzeiten in allen Knoten des Baumes exakt zu synchronisieren. Dies ist entscheidend, damit jeder Knoten die ihm zugeteilten Zeitschlitzte nutzen kann. Zudem enthält jeder Zyklus eine Uplink-Phase (U), d.h. für das Senden von Paketen von den Sensoren (Blätter) zum Repeater-Knoten (Wurzel). In dieser Phase übermitteln die Sensoren ihre Messwerte.



Legend:

Cycle parameters:

t_0 : cycle start time

d_{cycle} : cycle duration

Communication Phases:

S: Synchronization, J: Join, U: Uplink, D: Downlink, A: Approve, L: LoRaWAN, G: Guard

Abbildung 7: Struktur eines Übertragungszyklus' mit definierten Phasen (Farbcodierung) und bedarfsabhängig nutzbaren Zeitschlitzten.

Im Gegensatz dazu können in der Downlink-Phase (D) Kommandos und Konfigurationen vom System zu den einzelnen Sensoren übermittelt werden. Jeder Zyklus wird durch eine lange Guard-Phase (G) abgeschlossen. Diese dient einerseits dazu, die Funkvorschriften hinsichtlich der Sendehäufigkeit einzuhalten und andererseits, um benachbarten LoRaMesh-Bäumen Gelegenheiten für eine kollisionsfreie Übertragung zu ermöglichen.

Abbildung 8 veranschaulicht beispielhaft die Zuteilung von Zeitschlitzen für die Uplink-Phase, sogenannter Forwarding Windows. Die Abbildung zeigt, wann ein Knoten sendet und wann er auf Empfang sein muss. Die Zuteilung erfolgt basierend auf der Netzwerktopologie, d.h. der Anordnung der Knoten im Netzwerk. Die tiefste Hierarchiestufe erhält die frühesten Zeitschlitz für das Senden zugeteilt. Hierarchisch höherstehende Knoten nutzen spätere Zeitschlitz. Dieses Zuteilschema erlaubt die Kommunikation über mehrere Knoten (multi-hop) innerhalb des gleichen Zyklus. Trotz langer Zykluszeiten bleiben dadurch die Latenzen von multi-hop-Kommunikationen niedrig. In der Downlink-Phase erfolgt die Zuteilung entsprechend der geänderten Datenflussrichtung in umgekehrter Reihenfolge.

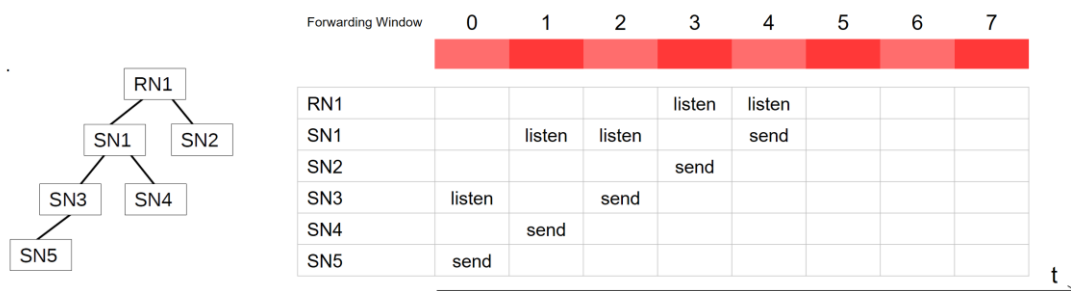


Abbildung 8: Zuteilung von Zeitschlitz (Forwarding Windows) in der Uplink-Phase anhand eines Beispielsnetzwerks.

Hardware: Sensorknoten und Repeaterknoten verwenden exakt die gleiche Hardware, allerdings in unterschiedlichen Gehäusen (siehe Abbildung 9). Während wir für den standardisierten LoRaWAN-Uplink im Repeaterknoten ein handelsübliches LoRaWAN-Modul verwenden, haben wir den LoRaMesh-Teil über eine Eigenentwicklung mit einem STM32-Microcontroller von *STMicroelectronics* und einem LoRa-Funkbaustein von *Semtech* realisiert. Dieser Ansatz erlaubte für die Prototypenphase eine hohe Flexibilität. Für eine Reduktion der Bauteilkosten können die beiden Kommunikationsarten, LoRaWAN und LoRaMesh, jedoch problemlos auf einem einzigen Funkbaustein zusammengefasst und implementiert werden.



Abbildung 9: Sensor- und Repeaterknoten (oben) während der Prototypen-Fertigung an der Eawag.

Zeitsynchronisation: Ein essentielles, jedoch nicht sichtbares Eigenmerkmal der Neuentwicklung ist die hochpräzise Synchronisation der integrierten Knoten mit der absoluten Weltzeit als Referenz. Dies ermöglicht an erster Stelle eine reibungslose Kommunikation im Subnetz (zeitschlitzbasiert), verortet aber auch jede einzelne Messung im korrekten zeitlichen Zusammenhang. Dies ist insbesondere für die räumlich differenzierte Überwachung von hochdynamischen Prozessen, z.B. bei Starkregenabfluss von entscheidender Bedeutung.

Das Angleichen der Echtzeituhr der Sensorknoten (im konventionellen LoRaWAN nicht vorhanden; die zeitliche Verortung des Messwertes erfolgt mit der Übertragung an den Gateway) erfolgt unter Verwendung einer externen Zeitquelle, die ausschließlich über die entsprechenden Repeaterknoten gesammelt wird. Wir haben zwei relevante Optionen implementiert und getestet: die Synchronisierung über das in Mitteleuropa weitreichende Zeitsignal DCF77 [10] und über intermittierend aktive GPS-Module.

6. Nachweis der verbesserten Übertragungszuverlässigkeit

Um die Funktion des LoRaMesh-Systems zu überprüfen, führten wir mehrere Feldversuche unter realen Anwendungsbedingungen über mehrere Monate (2018-2019) durch. Beispielfähig zeigen wir hier die Ergebnisse eines Feldversuchs in der Innenstadt von Basel. Im vorliegenden Fall verglichen wir für 23 Tage lang die Leistung von drei verschiedenen handelsüblichen LoRaWAN-Sensorknoten (Sensorknoten-IDs: 038, 5D6, CE4 - siehe Abbildung 10) mit der LoRaMesh-Anwendung (ID: 0FE). Alle Sensorknoten wurden dafür nebeneinander in einem Serviceschacht einer Fernwärmanlage im Zentrum der Stadt Basel installiert (siehe Abbildung 10). Der LoRaMesh-Repeater wurde 23 m vom Service-Schacht entfernt an einem Laternenpfahl in 4 m Höhe montiert. Repeater- und LoRaWAN-Sensorknoten übertrugen an einen Gateway, der in einer Distanz von etwa 2000 m auf einem Schornstein installiert ist. Das Übertragungsintervall wurde für die LoRaWAN-Referenzknoten auf 1, bzw. 10 Minuten eingestellt; der LoRaMesh - Sensorknoten übermittelte die Daten im 2-Minuten-Intervall.

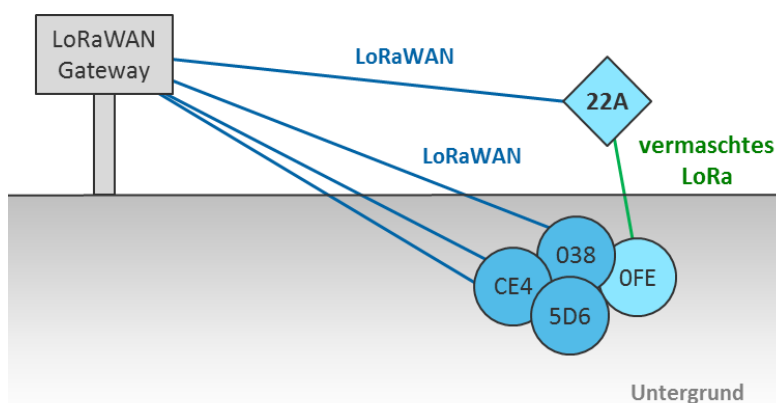


Abbildung 10: Versuchsaufbau im Feldversuch in einem Serviceschacht einer Fernwärmanlage in Basel. Die nebenstehenden Abbildungen zeigen den umzäunten Serviceschacht (rechts oben) und die nebeneinander montierten LoRaMesh- und LoRaWAN-Sensorknoten (rechts unten).



Die Ergebnisse dieses und anderer Feldversuche belegen eindrücklich die hohe Übertragungszuverlässigkeit des LoRaMesh-Systems. Abbildung 11 zeigt die verschiedenen Leis-

tungsindikatoren für einen Zeitraum von 3 Tagen, in dem alle am Test beteiligten Sensorknoten mit demselben Spreizfaktor (SF) übermittelten. Die Paketverlustrate des LoRaMesh-Sensorknotens (0FE) ist mit 1,3 % sehr niedrig, während die Paketverluste für Referenzknoten zwischen 9,7 % (5D6) und 51 % (CE4) liegen. Beachtenswert ist, dass die Verlustrate für das LoRaMesh-System rechnerisch den Paketverlust für zwei Übertragungspfade aufsummiert, den vom Sensorknoten zum Repeater und den vom Repeater zum Gateway.

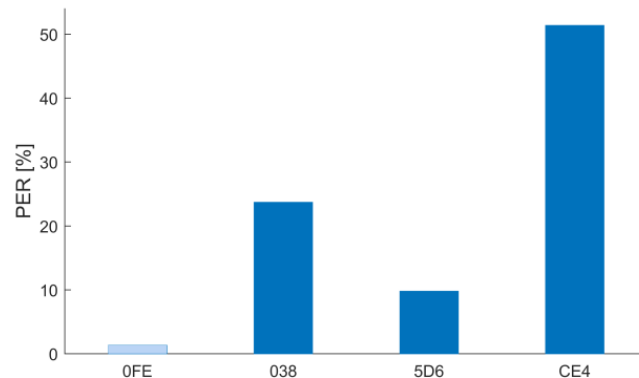


Abbildung 11: Paketverlustraten im Testzeitraum (25. bis 28. Mai 2018). Für den Zeitraum wurde die Übertragung für alle Knoten auf SF12 fixiert, um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Knoten 038, 5D6, CE4 sind dem LoRaWAN, der Knoten 0FE ist der LoRaMesh-Anwendung zuzuordnen.

Selbst unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Sendeintervalle – der Referenzknoten 5D6 überträgt im 10-Minuten-Intervall und ist damit weit weniger von LoRaWAN inhärenten Paketkollisionen betroffen - wird deutlich, dass die Übertragungszuverlässigkeit durch den Einsatz des LoRaMesh-System entscheidend verbessert werden konnte. Dieses Erkenntnis konnte durch weitere Feldversuche mit mehreren Test-Systemen bestätigt werden (siehe auch [1]).

7. Anwendungspotenziale

Die im Rahmen des oben beschriebenen Feldexperiments erhobenen Daten werden bereits jetzt erfolgreich zur Optimierung des Abwassersystems der Gemeinde und darüber hinaus genutzt: i) der unerwünschte Eintritt von Grundwasser durch undichte Kanäle wird über Pegelmessungen bestimmt, ii) die Entlastungsaktivität von Sonderbauwerken wird für einen effizienteren Gewässerschutz quantifiziert, iii) die Kalibrierung von Niederschlag-Abflussmodellen wird durch Echtzeitdaten gestützt und erhöht somit die Aussagekraft der Simulationsergebnisse [11], und iv) hydraulischen Engpässe, Überflutungsrisiken können besser und vor allem früher identifiziert werden - eine strukturierte Frühwarnung ist möglich. Darüber hinaus sehen wir ähnliches Anwendungspotenzial bei fehlender Möglichkeit einer hohen Gatewaydichte und gleichzeitig hohen LoRa-Signal-Dämpfungen bei der Überwachung von Bauwerken wie Talsperren, Wasserversorgungen in entlegenen Regionen wie Bergtälern oder im Bergbau.

8. Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Studie dokumentieren wir ein erfolgreiches Langzeitexperiment mit einem LPWAN-Sensornetzwerk im Vollmasstab, zeigen quantitativ die Grenzen von Niedrigenergiefunk im Untergrund auf und liefern mit der technologischen Neuentwicklung eines vermaschten, LoRa-basierten Funkstandards eine Datenkommunikation für reichweitenkritische Anwendungen bei niedrigsten Paketverlustraten. Die nunmehr 20 LoRaMesh-Prototypen sind fester Bestandteil des UWO-Sensornetzes und übermitteln zuverlässig Daten bei

stabilem Betrieb. Hard- und Firmware für diese Neuentwicklung unterliegen der GNU General Public License v3.0 Lizenz und sind zum Download frei verfügbar⁴.

Folgende Schlussfolgerungen für die Anwendung von LPWANs im Untergrund und die Industrialisierung des vermaschten LoRa-basierten Funks können gezogen werden:

Was ist möglich? Grundsätzlich eignet sich die Übertragungstechnologie LoRaWAN für räumlich verteilte, dezentral angeordnete Sensorik mit niedriger Stromaufnahme und geringem Datenaufkommen, d.h. in der Grössenordnung von wenigen Bytes pro zu übertragendem Paket. Die wesentlichen Vorteile ergeben sich durch eine hohe Skalierbarkeit, den niedrigen Energieverbrauch für die Datenübertragung, sowie die vergleichsweise geringeren Investitions- und Betriebskosten pro gemessenen Wert. In Verbindung mit einer integrierten Signalvalidierung (z. B. durch intelligentes Kombinieren von Signalredundanz und Signaldiversität) ist eine verbesserte Güte der gemessenen Information möglich. Die absolut zeit-synchrone Datenerhebung ist dabei insbesondere für eine ortsdifferenzierte, gegebenenfalls kompartimentübergreifende Prozessüberwachung von grossem Nutzen. Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch die Möglichkeit der Migration auf sowohl eine private Anwendung (eigenständiges Funknetz), als auch eingebunden in eine öffentlich verfügbare Funkinfrastruktur, z. B. das gemeinschaftsbasierte und schnell wachsende TheThingsNetwork⁶ oder Netze weiterer Drittanbieter.

Wo liegen die Grenzen? Der Reichweite von LoRaWAN bei der Übertragung aus unterirdischen Bauwerken ist stark begrenzt. Es erfordert entweder eine hohe Gatewaydichte oder den Einsatz der hier vorgestellten Weiterentwicklung LoRaMesh, um eine umfassende Netzabdeckung sicherzustellen. Bei LoRaWAN muss zudem akzeptiert werden, dass aufgrund von Paketkollisionen einzelne Pakete verloren gehen. Werden mehr Gateways eingesetzt, wird die Übertragungszuverlässigkeit durch vermehrte Paketkollisionen erwartbar negativ beeinflusst. Feldversuche müssen zeigen, wie ausgeprägt dieser Effekt in der Praxis auftritt.

Wo gibt es Entwicklungspotenzial? Obgleich die Vielzahl der positiven Erfahrungen und Vorteile klar überwiegt, bleiben einige Herausforderungen für zukünftige Entwicklungen: i) Weiterentwicklung der Bi-Direktionalität für Over-The-Air (OTA) - Updates und die Nutzung für unkritische Steuerungen, ii) energieautarker Betrieb der Sensoren und Funkknoten durch Verwendung von lokalen Energiequellen (*energy harvesting*) iii) Anpassung der Mess- und Übertragungsintervalle anhand von Wettervorhersagen (*adaptive sampling*).

Danksagung

Wir, die Autoren, möchten uns insbesondere bei den Einwohnern der Gemeinde Fehraltorf (Schweiz) sowie der lokalen Gemeindeverwaltung für die große Unterstützung bei der Umsetzung der Initiative bedanken. Im Weiteren danken wir der Firma *Hunziker Betatech* (Winterthur) für die freundliche Bereitstellung von Daten und Informationen zum Entwässerungssystem sowie den Firmen *Decentlab* (Dübendorf, CH) und Keller-Druck (Winterthur) für den Austausch und die Anfertigung der Sensorknoten nach unseren Wünschen. Bei der Betreiber des Fernwärmenetzwerkes der Stadt Basel (CH), IWB, möchten wir uns für das Interesse und die Unterstützung bei der Durchführung des Feldversuches bedanken. Ganz besonders danken möchten wir dem Feldtechniker der Eawag, Simon Dicht, der die Installation und die Wartung des UWO-Sensornetzes realisiert.

⁴ <https://github.com/Eawag-SWW/loramesh>

⁶ <https://opennetworkinfrastructure.org/> (letzter Aufruf 07.10.2020)

Literatur

- [1] C. Ebi, F. Schaltegger, A. Rüst, and F. Blumensaat, "Synchronous LoRa Mesh Network to Monitor Processes in Underground Infrastructure," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 57663-57677, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2913985.
- [2] L. Montestruque and M. Lemmon, "Globally Coordinated Distributed Storm Water Management System," presented at the CySWater'15, Seattle, USA, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1145/2738935.2738948>.
- [3] T. P. Ruggaber, J. W. Talley, and L. A. Montestruque, "Using embedded sensor networks to monitor, control, and reduce CSO events: A pilot study," (in English), *Environ. Eng. Sci.*, Article vol. 24, no. 2, pp. 172-182, Mar 2007, doi: 10.1089/ees.2006.0041.
- [4] I. Stoianov, C. Maksimovic, L. Nachman, A. Whittle, S. Madden, and R. Kling, "Wireless sensor network for monitoring a large-scale water infrastructure system, Boston, USA," in *Data requirements in integrated urban water systems*, vol. 1, T. Fletcher and A. Deletic Eds., (Urban Water Series, C. Maksimovic and A. Tejada-Guibert, Eds. Paris, France: UNESCO-IHP, 2008, ch. 24.
- [5] M. Lauridsen, H. Nguyen, B. Vejlggaard, I. Z. Kovacs, P. Mogensen, and M. Sorensen, "Coverage Comparison of GPRS, NB-IoT, LoRa, and SigFox in a 7800 km² Area," in *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 4-7 June 2017 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTCSpring.2017.8108182.
- [6] N. Varsier and J. Schwoerer, "Capacity limits of LoRaWAN technology for smart metering applications," in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 21-25 May 2017 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICC.2017.7996383.
- [7] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melià-Seguí, and T. Watteyne, "Understanding the limits of LoRaWAN," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600613.
- [8] LoRa Alliance, "LoRaWAN™ What is it? - A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™," LoRa® Alliance, 2015. [Online]. Available: <https://loralliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>
- [9] Semtech Corporation, "LoRa Modulation Basics," (accessed: 03-Nov-2018). [Online]. Available: <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>
- [10] D. Piester, P. Hetzel, and A. Bauch, "Zeit- und Normalfrequenzverbreitung mit DCF77," *PTB-Mitteilungen*, vol. 114, no. 4, p. 24, 2004. [Online]. Available: https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_4/4.4_zeit_und_frequenz/pdf/2004_Piester_-_PTB-Mitteilungen_114.pdf.
- [11] O. Wani, A. Scheidegger, J. P. Carbajal, J. Rieckermann, and F. Blumensaat, "Parameter estimation of hydrologic models using a likelihood function for censored and binary observations," *Water Research*, vol. 121, pp. 290-301, 9/15/2017 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.05.038>.